

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA METALURGIE A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ

636 – KATEDRA MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



STUDIUM AKUSTICKÝCH VLASTNOSTÍ SENDVIČOVÝCH STRUKTUR
STUDY OF ACOUSTICAL PROPERTIES OF SANDWICH STRUCTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

DUŠAN JUGAS

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. RNDr. PAVOL KOŠTIAL, Ph.D.

OSTRAVA 2016

Zadání bakalářské práce

Student: **Dušan Jugas**
Studijní program: B3923 Materiálové inženýrství
Studijní obor: 3911R028 Diagnostika materiálů
Téma: Studium akustických vlastností sendvičových struktur
Study of acoustical properties of sandwich structures
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Literární řešerše problematiky

Experimentální aparatura na měření akustických vlastností sendvičů

Zhodnocení naměřených výsledků

Seznam doporučené odborné literatury:

[1]Korínek, Z.: Kompozity – skriptum, <http://www.volny.cz/zkorinek>

[2]Ehrenstein, G., W., :Polymerní kompozitní materiály, Scientia, Praha 2009.

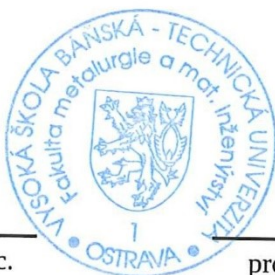
[3]Wanberg, J.: Composite materials, Wolfgang publication Inc., 2010.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **prof. RNDr. Pavol Košťál, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2015

Datum odevzdání: 20.05.2016




prof. Ing. Vlastimil Vodárek, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování bakalářské práce

I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání bakalářské práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah BP |
| 2. Originál zadání BP | 7. Textová část BP |
| 3. Zásady pro vypracování BP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníky a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
 - Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
 - Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.
- BP nemusí obsahovat experimentální (aplikační) část.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury). V případě, kdy zadání BP vychází ze spolupráce se subjekty mimo VŠB -TU Ostrava a řešení studenta, týkající se citlivých dat spolupracujícího subjektu, je zpracováno v samostatné zprávě, tak zveřejněná část BP bude zpracována v rozsahu min. 15 stran a celkový rozsah BP bude min. 25 stran.

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm, zarovnání do bloku.

Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9). Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků. Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690. Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*


dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení BP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2015/2016.

Ostrava 2. 11. 2015


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 5.5.2016

.....
podpis (jméno a příjmení studenta)

Poděkování

Tímto bych chtěl srdečně poděkovat všem, kteří mě během zhotovení bakalářské práce podporovali. Moje speciální díky patří zejména panu Prof. RNDr. Pavolu Košťalovi, Ph.D. za poskytnutí tohoto zajímavého téma bakalářské práce, za profesionální a ochotnou spolupráci při konzultacích a také za projevení důvěry a trpělivosti. Taktéž děkuji panu Ing. Vladimíru Rusnákovovi z firmy FORM s.r.o. za dodání vzorků sendvičů k praktické části bakalářské práce.

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je studium akustických vlastností sendvičových struktur. V teoretické části jsou popsány kompozitní materiály, předimpregnovaná vlákna prepregů, sendvičové struktury a využití sendvičových materiálů v průmyslu. Praktická část se zabývá měřením a vyhodnocením vzduchové neprůzvučnosti u dodaných vzorků. V textech experimentální části jsou také popsána provedená měření, použitá měřicí technika a na závěr jsou prezentovány získané výsledky.

Klíčová slova: kompozitní materiály; sendvičové struktury; vzduchová neprůzvučnost

ABSTRACT

The aim of this thesis is the study of acoustic properties of sandwich structures. In the theoretical part are described composite materials, pre-impregnated fibers of prepregs, sandwich structures and the usage of composite materials in the industry. The practical part deals with the measurement and evaluation of airborne sound insulation by the supplied samples. In the texts of the experimental part are also described the performed measurements, used measurement technique and at the end are presents the obtained results.

Key words: composite materials; sandwich structures; airborne sound insulation

OBSAH

ÚVOD	1
1 TEORETICKÁ ČÁST	3
1.1 SOUČASNÁ DEFINICE KOMPOZINÍCH MATERIÁLŮ	3
1.2 KLASIFIKACE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	3
1.3 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	4
1.3.1 Homogenita a nehomogenita.....	4
1.3.2 Izotropie a anizotropie	5
1.3.3 Synergický efekt.....	5
1.4 VŠEOBECNÉ VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	6
1.5 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	7
1.5.1 Podle druhu matrice.....	7
1.5.2 Podle druhu výztuže.....	7
1.6 PREPREG TECHNOLOGIE	9
1.6.1 Systém prepreg, využití.....	9
1.6.2 Výroba prepregů.....	10
1.7 SENDVIČOVÉ MATERIÁLY	13
1.8 SENDVIČOVÁ JÁDRA	16
1.8.1 Voština.....	16
1.8.2 Balzové dřevo	19
1.8.3 Tuhé pěny	20
1.9 KRYCÍ VRSTY SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ.....	21
1.10 SENDVIČOVÉ MATERIÁLY V PRŮMYSLU	22
2 PRAKTICKÁ ČÁST.....	23
2.1 CHARAKTERISTIKA DODANÝCH VZORKŮ	23
2.2 MĚŘENÍ AKUSTICKÉ NEPRŮZVUČNOSTI	24
2.2.1 Rozdělení akustických vlastností	24

2.2.2	<i>Stanovení laboratorní neprůzvučnosti R vzorku plošného materiálu dle ISO 10140</i>	24
-------	---	----

3	ZÁVĚR	34
----------	--------------------	-----------

3.1	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	35
-----	---------------------------------	----

ÚVOD

V historickém vývoji se ukázalo, že vytvoření jednoho nebo více materiálů se všemi ideálními vlastnostmi dohromady je málo ekonomické, protože celá řada z nich bývá v průběhu použití materiálu nevyužita. Mnohem ekonomičtější je vytvoření strukturně složeného materiálu „kompozitu“ (např. sendvičové struktury), kde při selhání jedné části je umožněna další funkce bez výrazného narušení.

V obecném slova smyslu je dnes v podstatě každý používaný materiál kompozitem; najít materiál v čisté podobě je prakticky nevšední. Je-li uvažován materiál v molekulárním nebo atomovém měřítku, pak je většinou tvořen z různých atomových nebo molekulárních částic.

Mezi výrazně staré kompozitní materiály se řadí malty a beton, které jsou dochovány z římských dob. Dále se kompozity používaly na konstrukce zbraní např. pro mongolské luky, dělové hlavně, meče atd. Vzhledem k tomu, že některé zastaralé i novější materiály se mohou označovat za kompozity, samotná moderní věda o kompozitech vznikla mnohem později. Tím však nelze říct, že by studium kompozitů nebo podobných skupin materiálů bylo nové, ale vyvíjení a výzkum v tomto odvětví byl velmi nestálý, a proto až za poslední dobu vznikají úsilí koordinace této práce.

Za posledních 50. let jsou kompozitní materiály předmětem stále se zvyšujícího zájmu odborných pracovníků. S narůstajícím vývojem a zkoumáním kompozitních materiálů se zvyšují požadavky na vzdělání inženýrů a technických odborníků. Je důležitá komplexní znalost a posuzování všech vlastností složek v kompozitním materiálu.

Kompozitní materiály jsou v současnosti průmyslovým materiálem celého světa. Původně se využívaly v období druhé světové války jako vojenský materiál, obzvláště pak v rozmezí 40. a 50. let v námořnictví, což vedlo k jejich zviditelnění a reklamě. Veškerý průmysl je dnes fixovaný na výrobcích z plastů, které jsou vyztuženy vlákny. Vláknové kompozity jsou vysoce pevné, tuhé a mají nízkou hustotu skleněných, aramidových, uhlíkových nebo jiných vláken. Kompozitní materiály jsou v produkci dávno před ostatními materiály a to díky svým jedinečným mechanickým vlastnostem, konstrukční přizpůsobivosti a lehké výrobě. Kompozitní materiály (zejména vláknové) se liší od ostatních materiálů tím, že při výrobě kompozitní konstrukce je vytvořena u materiálu i struktura.

Cíle této bakalářské práce jsou následující:

- literární rešerše problematiky,
- experimentální aparatura na měření akustických vlastností sendvičů,
- zhodnocení naměřených výsledků.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 SOUČASNÁ DEFINICE KOMPOZINÍCH MATERIÁLŮ

Kompozitní materiál je kombinací dvou nebo více materiálů (vyztužovací prvky, výplně a matrice), které se liší tvarem nebo složením. Složky si v nich uchovávají svou identitu (tzn., navzájem se nerozpouštějí ani neslučují). Každá složka je fyzikálně identifikována a mezi ní a jinými složkami je rozhraní. Jednotlivé fáze kompozitních materiálů se vzájemně odlišují svými mechanickým, chemickými a fyzikálními vlastnostmi.

Kompozity se odlišují od slitin především tím, že si ponechávají svou charakteristiku. V materiálovém systému se uplatňují jejich přednosti, aby se dosáhlo zlepšení vlastností. Na rozdíl od kompozitních materiálů je vhodnější označovat slitiny kovů a polymerní slitiny za kompozice, protože u nich chybí některé základní znaky kompozitního působení [1], [2], [3].

1.2 KLASIFIKACE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Vícefázový materiál je zařazený mezi kompozitní materiály jsou-li splněny následující předpoklady [4]:

- množství výztuže je větší než 5 %,
- matrice a výztuže se odlišují z hlediska mechanických, fyzikálních a chemických vlastností,
- výztuž je výrazně pevnější v tahu a často tužší oproti matrici,
- kompozit je připraven smíšením složek.

Na základě výše uvedených podmínek se za kompozit nepovažuje plast, který obsahuje malý podíl tuhých barviv, např. černý pigment nebo bílý pigment nebo částice elastomerů, které jsou přidány k vylepšení vlastností. Za pravé kompozity nejsou považovány eutektické slitiny kovů, u kterých se vyloučily tvrdé a tužší fáze v průběhu procesu tuhnutí taveniny, čímž se nesplňuje podmínka o smíchání složek. Naopak kov disperzně zpevněný částicemi oxidů je kompozitním materiálem, neboť je připravován mechanickým smícháním složek (př. hliník zpevněný Al_2O_3) [4].

1.3 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

1.3.1 Homogenita a nehomogenita

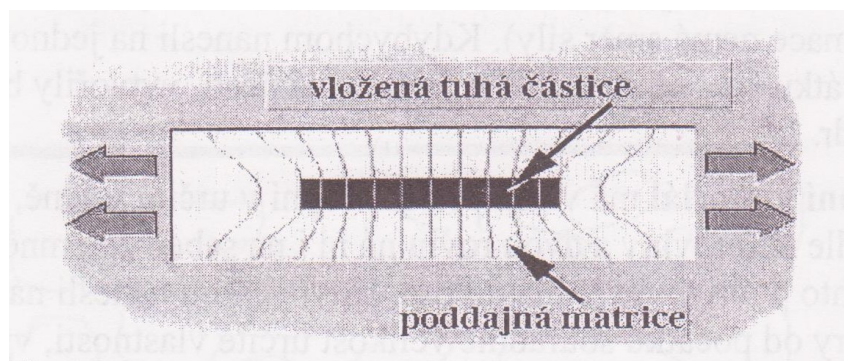
Technické materiály jsou při atomárním zobrazení nehomogenní. Z toho důvodu se požaduje, aby nehomogenity u kompozitních materiálů byly ve větším měřítku než atomárním.

V případě homogenity je možné se setkat se dvěma problémy:

Nanokompozity můžou být rozměry nehomogenit na blízku atomárním rozměrům. U těchto kompozitů nejsou úplně využity jenom rovnice klasické fyziky, ale můžou nastat i efekty spojené s atomovou fyzikou.

Některé struktury jsou podobné kompozitům, avšak počet nehomogenit je značně malý, proto se materiál nepovažuje za přirozeně homogenní v makroměřítku. Můžou to být např. několikavrstvené struktury (vrstvená skla) nebo armovaný beton. V této situaci se jedná o kompozitní struktury. Jejich výpočet je blízký výpočtovým metodám u kompozitů.

Kompozit je uvnitř nehomogenní, ale z makroskopického hlediska homogenní, což zavádí vlastnosti kompozitního materiálu, které jsou mnohokrát smyšlené. Vysvětlení je uvedeno na (obr 1.1) [3].



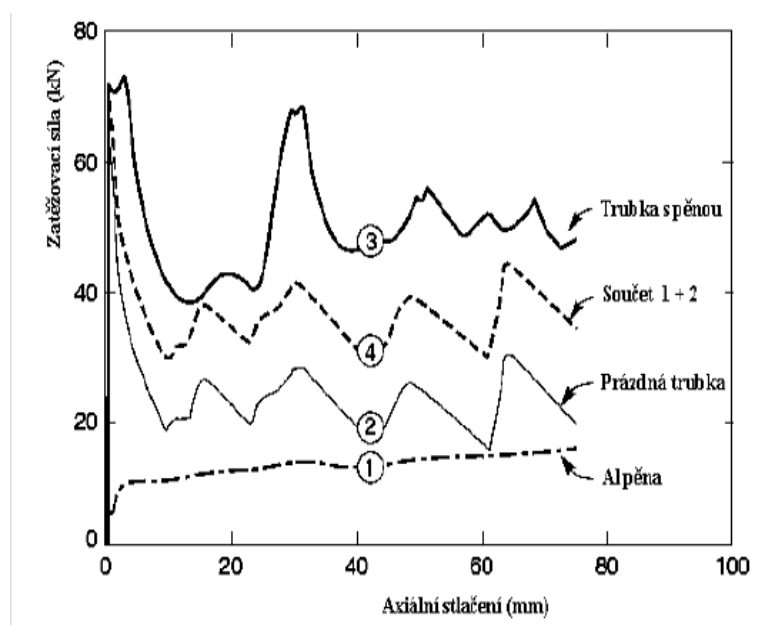
Obr. 1.1. Deformace části kompozitu jednoosým tahovým napětím [3].

1.3.2 Izotropie a anizotropie

Některé technické materiály jsou plně izotropní – např. skla. Anizotropie je způsobena vnějšími vlivy – např. tažený drát za studena. Řada kompozitních materiálů je silně anizotropní. U kompozitu se skleněnými vlákny a matricí z plastu se jeho tuhost a pevnost ve směru vláken a kolmo na vlákna může lišit až řádově [3].

1.3.3 Synergický efekt

Synergický efekt je uváděn jako efekt, při kterém jsou v kompozitu vhodně zkombinovány pozitivní vlastnosti jeho složek tak, že výsledný celek je větší, než součet složek. Obvykle se snažíme docílit u kompozitních materiálů největšího synergického účinku, a to zejména u těch vlastností, které jsou pro nás nejdůležitější. Sendvičový efekt je znázorněn na (obr. 1.2) [3].



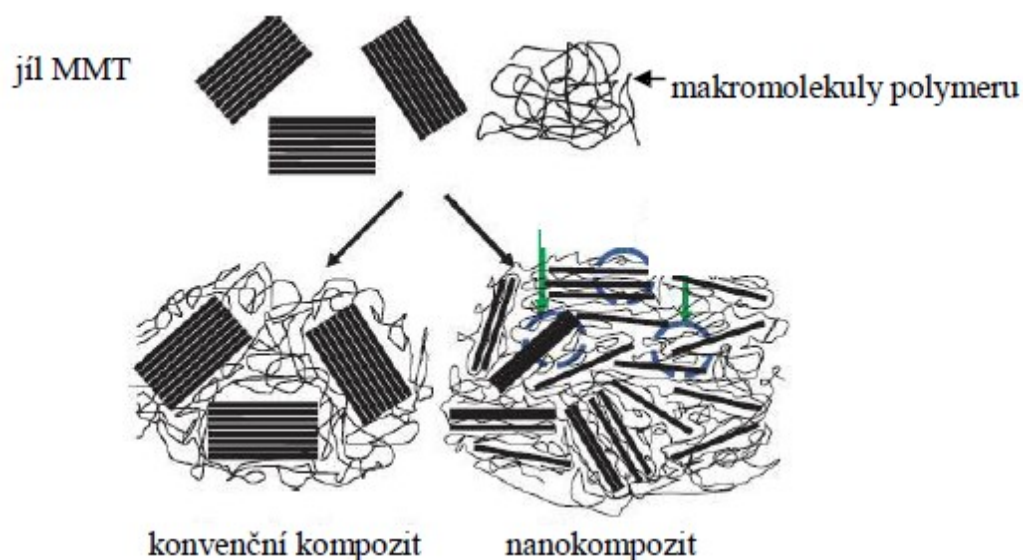
Obr. 1.2. Ukázka synergického účinku u kompozitní struktury z hliníkové pěny, která je umístěna do tenkostěnné trubky z hliníku [3].

1.4 VŠEOBECNÉ VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

V kompozitních materiálech se mohou objevovat různé rozměry vyztužujících částí. Velký význam v průmyslovém odvětví mají **mikrokompozity**, jejichž největší příčné rozměry jsou v rozmezí 10^0 až 10^{12} μm . V porovnání s kovy a jejich slitinami mají mikrokompozity nižší hustotu a tím pádem příznivější poměr pevnosti v tahu a modulu pružnosti k hustotě – dosahují velké měrné pevnosti.

Makrokompozity jsou využívány hlavně ve stavebnictví (železobetonové výztuže, polymerbetony). Dále jsou mezi makrokompozitní materiály řazeny vícevrstvé materiály (př. chodníky a vozovky). U makrokompozitů jsou příčné rozměry vyztužujících elementů 10^0 až 10^{12} mm.

U **nanokompozitů** se pohybuje rozměr výztuže v řádech nm. Obr. 1.3 ukazuje podstatu rozdílu mezi mikrokompozitním a nanokompozitním materiálem s výztuží destičkovitých jílu – montmorillonitu (MMT) [4].



Obr. 1.3. Ukázka rozdílnosti mezi nanokompozitem a mikrokompozitem [4].

1.5 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

1.5.1 Podle druhu matrice

Matrice je spojitou fází v kompozitu. V kompozitních materiálech zastává tyto úlohy: pomocí matrice je spojena sekundární fáze (vyztužující) v soudržný celek a slouží tedy jako pojivo. Prostřednictvím matrice je ochráněna vyztužující fáze před působením vnějšího okolí, je zprostředkováno přenesení sil na dispergovanou fázi, vzájemně jsou odděleny částice nebo vlákna od sebe [5].

Jednotlivé druhy matric [5]:

- **polymerní matrice:** jsou nejpoužívanější u kompozitů s kontinuálními vlákny. Matrice je tvořena např. termoplastem (polypropylen, polyamid, polykarbonát), reaktoplastem (epoxid, nenasycený polyester) nebo síťovaným elastomerem (styren-butadien, akrylonitril-butadien). Velký význam z hlediska vyztužení mají vláknové materiály (sklo, uhlí, aramid),
- **keramické matrice:** jsou významné svou dobrou pevností v tahu i při teplotě, kterým jiné matrice neodolávají. Matrice je tvořena např. karbidem, nitridem nebo oxidy křemíku a zirkonia. K vyztužení se používají uhlíková nebo keramická vlákna,
- **uhlíková matrice:** matrice je tvořena uhlíkem. Sekundární fází jsou uhlíková vlákna,
- **kovová matrice:** matrice je tvořena např. lehkými slitinami (hliníku, hořčíku, titanu), dále jsou to slitiny železa, kobaltu a mědi. Vyztužující fází jsou uhlíková vlákna.

1.5.2 Podle druhu výztuže

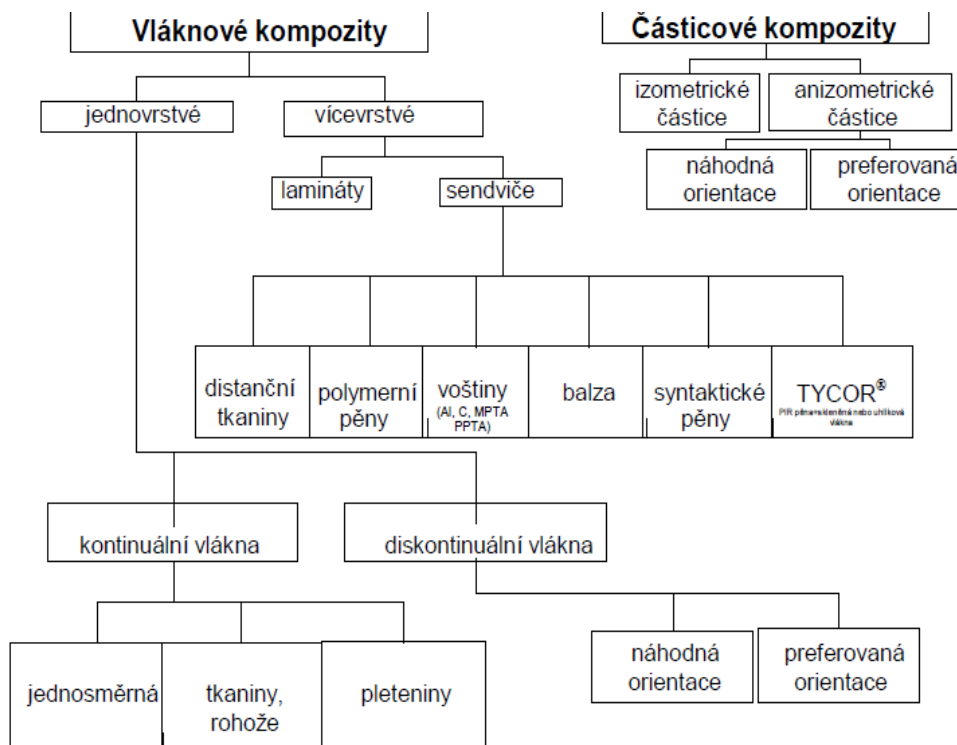
Výztuž je nespojitou sekundární fází. Její úlohou je vznik nového materiálu s dobrými mechanickými vlastnostmi. Tato fáze je také zprostředkovatelem elektrické vodivosti [5].

Jednotlivé druhy výztuže [5]:

- **částicové kompozity:** částice v kompozitech jsou náhodně orientovány,
- **krátkovláknové kompozity:** vyztužující fáze je složena z vláken, které mají délku až stonásobnou v porovnání s jejich tloušťkou,
- **dlouhovláknové kompozity:** nespojitá fáze je tvořena dlouhými vlákny o velké délce (desítky až stovky mm). Jsou buď orientována náhodně, nebo s přednostní orientací v ploše,
- **hybridní kompozity:** jedná se o spojení různých vláken, např. tkanina složená z uhlíkových a aramidových vláken.

Mikrokompozity jsou děleny (obr 1.4) [4]:

- částicové - většinou anorganické částice, anizometrické částice (destičky)
- vláknové

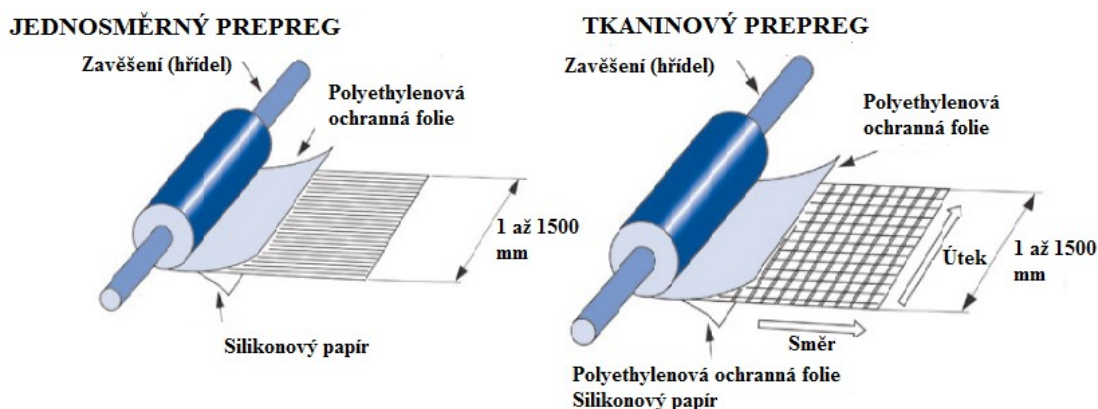


Obr. 1.4. Schéma rozdělení mikrokompozitů [4].

1.6 PREPREG TECHNOLOGIE

1.6.1 Systém prepreg, využití

Jako „prepregy“ (obr. 1.5) se označují polotovary pro výrobu vláknových kompozitů sestávajících se z kontinuálních vláken, impregnovaných částečně vytvrzenými pryskyřicemi. Prepregy jsou impregnovány epoxidovou nebo fenolickou matricí. Na vyztužení se používají skleněná, uhlíková, aramidová nebo také přírodní vlákna. Nejčastější jsou tkaninové prepregy, ale také se nechávají předimpregnovat pásy, jednosměrné a multiaxiální struktury [6], [7].



Obr. 1.5. Prepregy jako polotovary z předimpregnovaných vláken, *jednosměrný prepreg* (vlevo) a *tkaninový prepreg* (vpravo) [8].

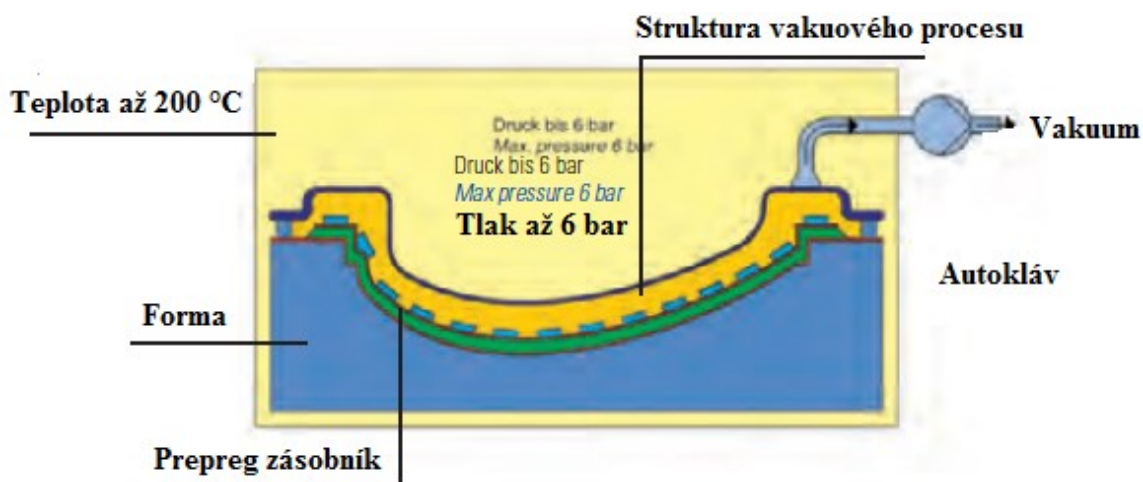
Prepregy jsou zpracovány v oblasti lehkých konstrukcí pro různé produkty. Nacházejí se např. jako vstup do takzvaných sendvičových konstrukcí, které jsou univerzálně využívány v dopravní technice. Sendvičová jádra (např. pěny, dřevo, plasty...) jsou připojena z obou stran k prepregu, čímž se vytvoří extrémně lehká, ale velmi stabilní struktura. Další velkou oblastí použití jsou lamináty, které vznikají vrstvením více prepregů, mimo jiné se předimpregnované materiály uplatňují v elektrotechnice jako vodivé desky [9].

1.6.2 Výroba prepregů

Zejména při výrobě dílů z větších tloušťek je nutné dbát zvýšené pozornosti. U laminátu z vyšší tloušťky by mohlo dojít k přehřátí středních vrstev laminátu a poklesu mechanických vlastností a to z důvodu exotermické reakce, která se objevuje při vytvrzování pryskyřice [10].

Autoklávová technologie:

Proces autoklávu (obr. 1.6) je jeden z nejdražších a nejvíce komplikovaných způsobů zpracování. Zpravidla je aplikován při používání prepregů. Z prepregů se nechají vylisovat komplikované, mechanicky a teplotně zatížené konstrukční díly. Objemový podíl vláken se nachází nad 60 %, obsah vzduchových pórů je velmi nepatrný. Kvůli vysokým nákladům se proces autoklávu používá především pro výrobu složitějších dílů s nejvyššími požadavky, např. v leteckém (Airbus) a kosmickém průmyslu, ale i v závodním sportu (Formule 1). Během „normálního“ vakuového procesu je dosaženo maximálního tlaku 1 bar (tj. tlak okolního vzduchu). V tlakové nádobě autoklávu (obr. 1.7) se pracuje s tlakem > 6 bar, který je přenášen na laminát, za účelem vytvrzení prepregu. Teplota v autoklávu se pohybuje okolo 170°C [11].



Obr. 1.6. Autokláv s vytvrzovaným prepregem [11].



Obr. 1.7. Tlaková nádoba autoklávu [12].

Proces vytvrzení v autoklávu pro tenkou část je následující [10]:

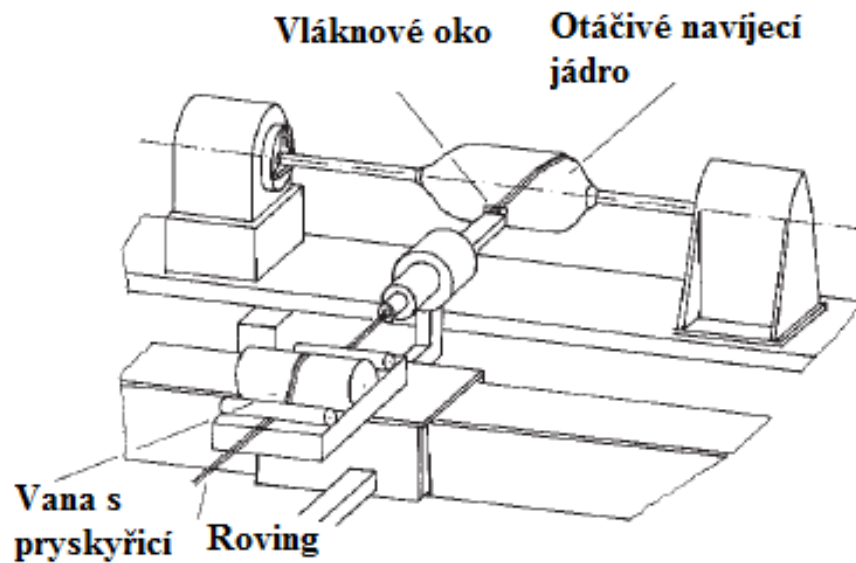
- vytvoří se vakuum ($0,9$ bar),
- v autoklávu se aplikuje měřený tlak 7 bar,
- redukuje se vakuum na bezpečnou hodnotu $0,2$ bar, na měřidle v autoklávu se ukazuje hodnotu 1 bar,
- ohřev na $1-3$ °C/min na 120 °C,
- setrvá se na teplotě 120 °C na dobu 60 minut,
- ochlazuje se rychlostí $2-5$ °C/min,
- zvyšuje se tlak v autoklávu.

Navíjení:

Při navíjecím procesu jsou vyztužená vlákna navinuta na jádro. Tento proces se hodí převážně pro rotačně symetrické díly, jako nádrže, trubky a šachty. S víceosým pohyblivým vedením niti se můžou navinout také komplikovanější části, jako např. ohnuté trubky (kolena). Navíjecí stroj (obr. 1.8) se skládá z otáčivého zařízení pro rotační pohyb jádra, z jednoho vodiče niti, pryskyřicové vany a rovingu (svazek vláken) [11].

Atributy procesu navíjení [11]:

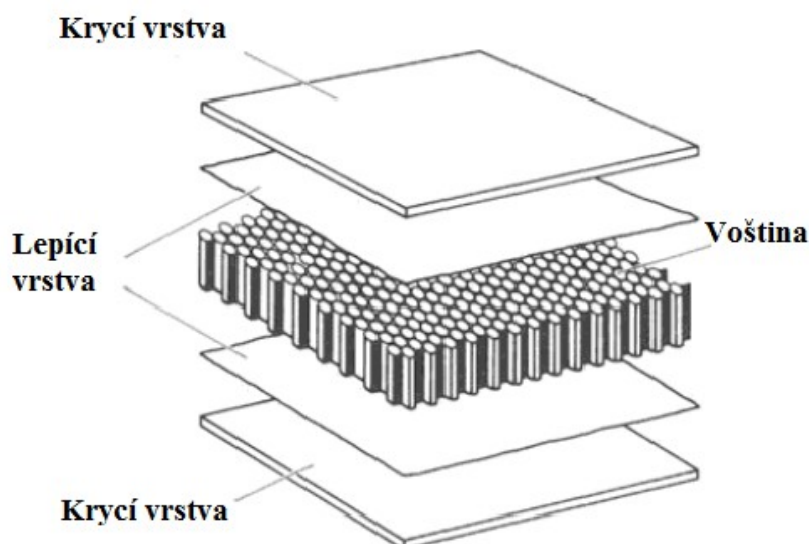
- vysoká přesnost a dobrá reprodukovatelnost,
- převážně automatizovaný,
- ekonomicky nenáročný.



Obr. 1.8. Proces navíjení [11].

1.7 SENDVIČOVÉ MATERIÁLY

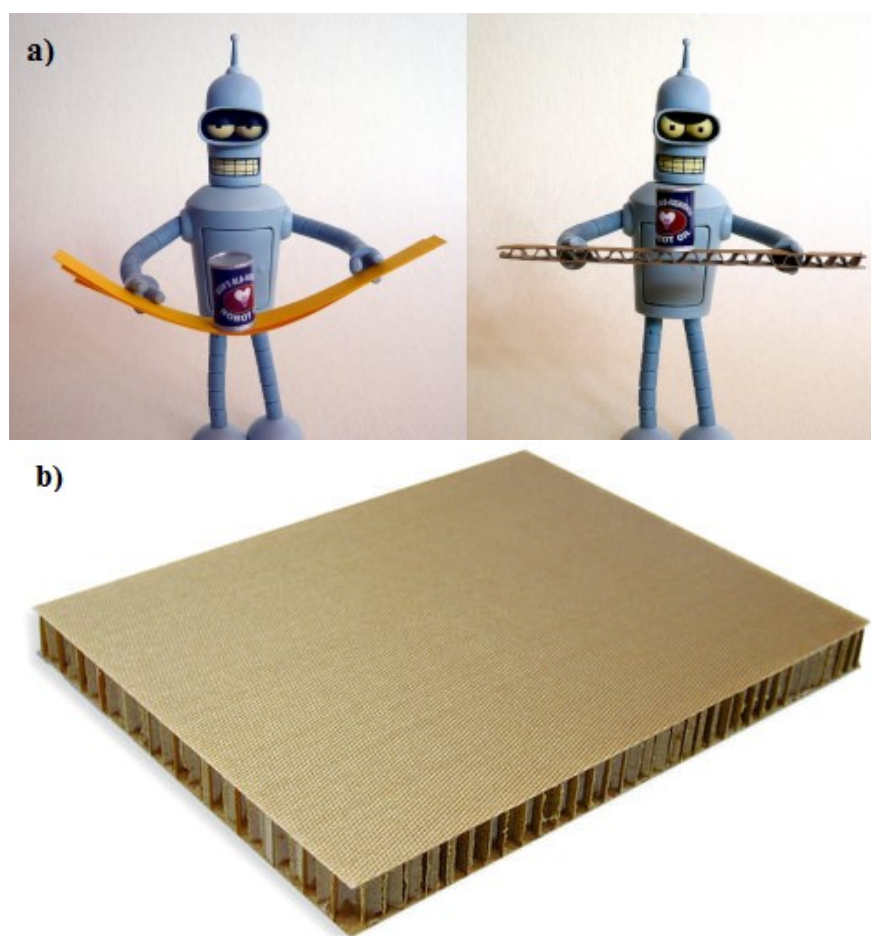
Sendvičové panely (obr. 1.10b), jsou považovány za třídu kompozitních struktur, jsou navrženy tak, aby nosníky nebo panely byly lehké, vyznačují se relativně vysokou tuhostí a silou (obr. 1.10a). Ačkoliv se z velké části skládají „ze vzduchu“, jsou vyrobeny z vysoce kvalitního materiálu. Sendvičový panel je složený ze dvou vnějších vrstev, které jsou od sebe odděleny nebo slepeny tlustším jádrem (obr. 1.9). Vnější vrstvy jsou vyrobeny z relativně tuhého a pevného materiálu, zejména z hliníkových slitin, vyztuženého plastu, titanu nebo oceli: propůjčují jim vysokou pevnost a tuhost a musí být dostatečně odolné, aby odolaly tahovému a tlakovému namáhání v důsledku zatížení. Materiál jádra je lehký s nízkým modulem pružnosti. Jádrové materiály jsou např. pevné polymerní pěny, (tj., fenoly, epoxidy, polyuretany), dřeva (tj., balzové dřevo) a voštiny, známé jako „honeycomb“ [13], [14].



Obr. 1.9. Schéma sendvičové struktury s voštinou a krycími vrstvami [15].

Sendvičovým jádrem je zajištěna trvalá podpora pro čelní plochy, mimo to jsou jádra dostatečně pevná ve stříhu, aby byly schopné odolávat příčné smykové tuhosti (odolávat deformaci panelu). Tahová a tlaková napětí jsou na jádru zanedbatelná v porovnání s vnějšími vrstvami. Jádro, které je z „voštiny“ se skládá ze struktury, ve které jsou do sebe zapadající šestiúhelníkové buňky, jejichž osy jsou orientovány kolmo k povrchu letadel. Voštinový materiál je především z hliníku nebo aramidového polymeru. Pevnost a tuhost voštiny je závislá na druhu materiálu, velikosti buněk a tloušťce buněčných stěn [13].

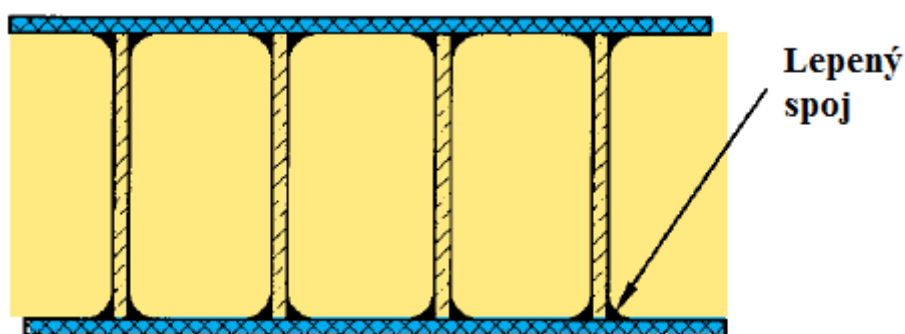
Sendvičové struktury jsou důležitou součástí moderních lehkých konstrukcí. Využívají se v široké škále aplikací, jako střechy, podlahy, stěny budov a v leteckém průmyslu u letadel (tj., pro křídla, trup). Velké využití sendvičových struktur je také ve větrné energii. Lopatky větrné turbíny jsou vyrobeny ze sendvičových kompozitních materiálů, které jsou během provozu odolné vůči silnému větru a odstředivým silám. Pro zvýšení kapacity a efektivnosti větrných turbín jsou požadovány větší rotorové lopatky. A proto jsou tyto lehké a cenově výhodné vysokovýkonné inteligentní materiály dost vyhledávány [13].



Obr. 1.10. a) *Nárůst energie u sendvičové konstrukce, aniž by se nosník prohнул [16], b)* *Sendvičový panel [17].*

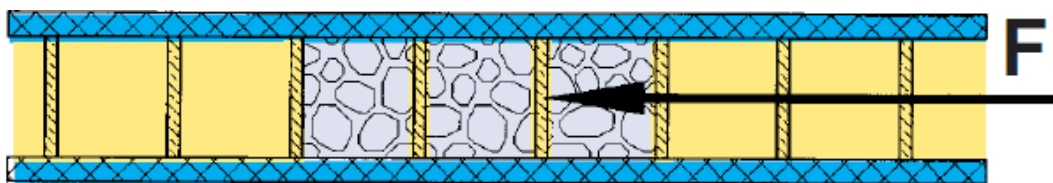
Podstatným faktorem je při návrhu sendvičových panelů zvolení správného lepidla ke spojení jádra a krycí vrstvy. Typická buněčná jádra jsou dnes spojena s vnější vrstvou lepením. Množství použitého lepidla a tvar lepících švů jsou zde určující pro kvalitu spojení a tím i pro jakost sendvičové struktury. Důležité je, aby lepený spoj, podobný svarovému spoji vytvořil co možná největší poloměr a pokud možno, aby se roztáhnul daleko podél buněčné

stěny ke středu jádra (obr. 1.11). Toho se může dosáhnout tepelným procesem, při kterém je lepidlo soustředěno v prvním kroku v oblasti buněčné stěny, známý jako síťování. Díky takovému procesu se může pevnost spojení jádra a vnější vrstvy při použití identického množství lepidla zdvojnásobit [18].



Obr. 1.11. Díky tvorbě lepených spojů je dosaženo optimálního spojení mezi voštinovým jádrem a krycími vrstvami [11].

Mimořádná pozoronost je nezbytná při vytváření zavedení sil. Síly se vedou jako tahové zatížení ve směru roviny do sendviče (obr. 1.12). V oblasti zavedení sil jsou voštinová jádra vyplněna pryskyřicí. V závislosti na úrovni zatížení jsou krycí lamináty dodatečně zesíleny vrstvou tkaniny. Při zavedení momentů nebo sil kolmých k sendvičové rovině je ve většině případů vhodné uspořádání žeber potřebné [11].

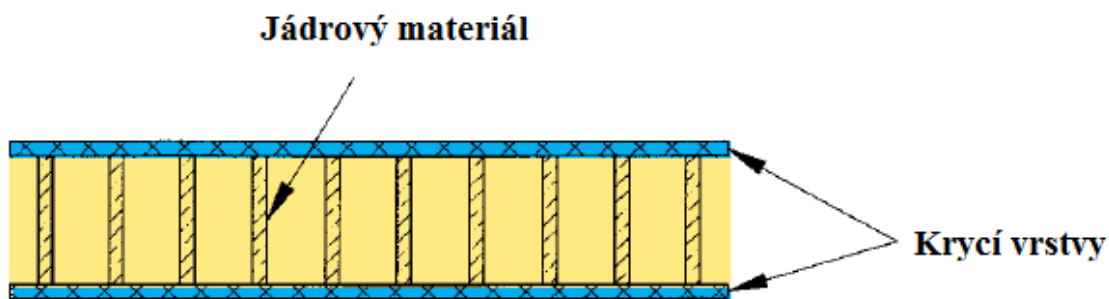


Obr. 1.12. Výhodné je vedení síly jako tahového zatížení ve směru roviny [11].

Sendvičové konstrukce nejsou jenom ploché desky, ale i složitější plochy. U složitě tvarovaných sendvičů je aplikace kovové vnější vrstvy velice drahá, z toho důvodu se spíše upřednostňují kompozitní vnější vrstvy. Pokud je například požadována zakřivená sendvičová struktura, pak je dost komplikované použít šestihrannou voštinu, v tomto případě je nahrazena voštinou s jiným tvarem buněk (obdelník, lastura, apod.) [19].

1.8 SENDVIČOVÁ JÁDRA

Materiálová jádra se nachází v sendvičové struktuře mezi dvěma krycími vrstvami (obr. 1.13). Skládají se z lehkého materiálu, který je podepřen krycí vrstvou proti sobě. Mezi nejznámější jádrové materiály se řadí voštinová jádra a pěnové hmoty různých charakteristik. Materiálem u sendvičového jádra je také hliník, plast nebo kovové pěny. Nejen zlepšení tuhosti je u sendvičových materiálů dosaženo, ale vylepšuje se také zvuková a tepelná izolace. Částečně jsou optimálně přizpůsobeny na aerodynamické obrysy nebo na jiné geometrické okrajové podmínky [9], [20].



Obr. 1.13. Lehký, tlakově odolný jádrový materiál má v sendvičové struktuře úkol, aby se obě tenké vrstvy držely ve vzdálenosti. Díky tomu je dosaženo velké efektivity tloušťky stěny při nepatrné hmotnosti [11].

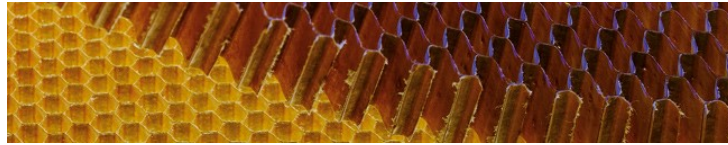
1.8.1 Voština

Voštiny jsou lehký jádrový materiál, který je k dostání v různých velikostech buněk a hustotách, nabízejí velké množství mechanických a tepelných vlastností. Voštinová jádra se pyšní jedinečnou strukturou, kterou je možné vyrobit z různých druhů materiálu, např. z termoplastů, skleněných vláken, uhlíkových vláken, hliníku a aramidu. Voštiny jsou ideálním jádrovým materiálem pro sendvičové struktury a starají se o efektivní příjem energie, poskytují neobyčejnou tuhost a pevnost s nízkou hmotností. Používají se v leteckém a vesmírném průmyslu, kromě toho také k tlumení šumu a v elektrických aplikacích [21].

Aramidové voštiny CORMASTER®

Aramidové voštiny (obr. 1.14 a obr. 1.15) jsou známy pod názvem „Honeycomb“. Desky z fenolové pryskyřice aramidu jsou využívány jako jádro pro extrémně lehké a vysoko pevnostní sendvičové lamináty. Standartní voština má šestiúhlý průřez (hexagonální). Pro

optimální zalepení voštinového jádra a krycí vrstvy se vytvrzuje kompozitní laminát pod tlakem, např. pod vakuem, v hydraulickém lisu nebo v autoklávu [14].



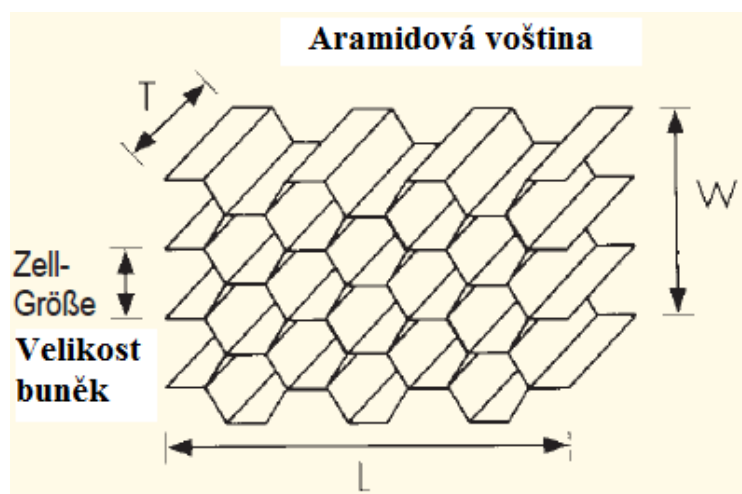
Obr. 1.14. Aramidová voština CORMASTER® [14].

Výhody aramidových voštin [14]:

- nízká hmotnost,
- provozní teplota až do 180 °C,
- odolnost proti vodě, oleji a pohonným hmotám,
- tvarově stabilní za tepla a vlhkosti.

K dispozici jsou pro příklad voštinová jádra od firmy R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH s průměrem buněk 3,2 mm. Mimořádné vlastnosti těchto aramidových voštinových jader jsou následující [11]:

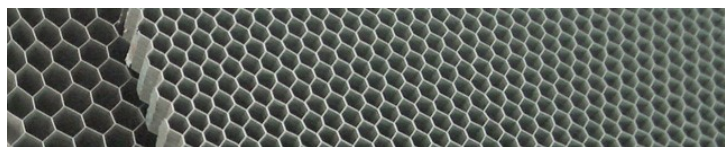
- nízká hustota od 29 g/cm³,
- vysoká pevnost v tlaku nejméně od 0,54 N/mm²,
- vysoká pevnost ve smyku nejméně od 0,56 N/mm²,
- velmi dobré lepení s vyztuženými vlákny plastů.



Obr. 1.15. Řez aramidovou voštinou, která je výbornou alternativou pro sendvičová jádra [11].

Hliníkové voštiny

Hliníková voština (obr. 1.16) je lehký materiál pro strukturní části s obzvláště vysokou pevností a tuhostí. Materiál je odolný vůči korozi, tepelně vodivý a žáruvzdorný. Zejména kvůli jeho tvárnosti může pojmout vysokou energii. Sendvičové struktury s hliníkovými voštinovými jádry se proto zařazují mezi havarijní elementy. Pro získání potřebného tvaru jsou voštiny tvarovány ve formách s pomocí tlaku či vákua. Voštiny jsou z obou stran opláštěny, aby byl zachován jejich tvar a požadovaná pevnost. Voštinová hliníková jádra jsou například využívána u nízkopodlažní tramvaje Astra (obr. 1.17), kde se požaduje vysoká tuhost vysouvací plošiny pro bezbariérový nájezd invalidních vozíků [14], [19].



Obr. 1.16. Hliníková voština [14].

Výhody hliníkových voštin [14]:

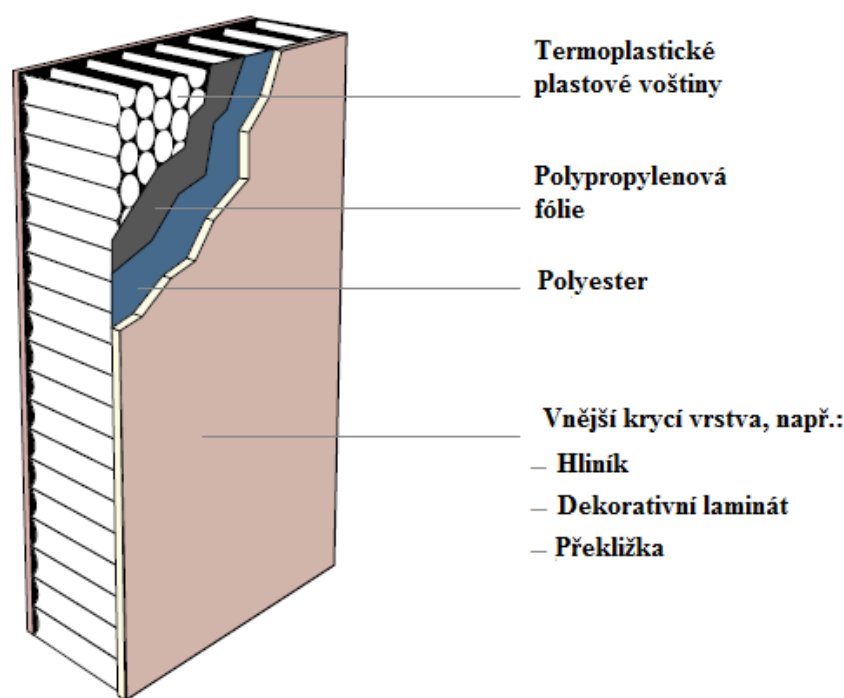
- nízká hmotnost,
- vysoká pevnost v tlaku,
- korozní odolnost,
- vysoká absorpce energie při nárazu.



Obr. 1.17. Plzeňská nízkopodlažní tramvaj Astra 309, která má zaintegrovanou vysouvací plochu pro vozíčkáře z hliníkové voštiny a z kovového potahu [22].

Tubus[®] PP – Voština

Lehký materiál z polypropylenu pro výrobu sendvičových kompozitních laminátů se nechá zpracovat v otevřené formě nebo v uzavřeném procesu. Příčný průřez je na rozdíl od aramidových voštin kruhový. Díky tomu jsou Tubus[®] PP voštiny (obr. 1.18) izotropní. Kompozitní lamináty s Tubus[®] PP jako sendvičové jádro jsou tlakově a ohybově odolné. Dále jsou odolné proti korozi, povětrnostním vlivům a dobře se recyklují [14].



Obr. 1.18. Kruhová voština Tubus[®] PP [14].

1.8.2 Balzové dřevo

Balza je neobyčejně rychle rostoucí stálezelený listnatý strom. Vyskytuje se v tropických oblastech Jižní a Střední Ameriky. Téměř veškerá celosvětová poptávka na balzové dřevo je pokrytá Ekvádorem. Růst balzových stromů je enormní. Už po druhém roce dosahuje výšky 4 až 6 metrů a po 5 letech se jeho výška pohybuje od 22 metrů a výše. Již od 16. století se balzové dřevo (obr. 1.19) v Jižní Americe upřednostňovalo jako surovina pro stavbu lodí. Vzhledem k nízké specifické hmotnosti (asi 140 kg/m³) se balzové dřevo využívá jako nosný materiál.

Balza je dobře zpracovatelný druh dřeva, který se řeže kolmo na směr vláken, prokazuje se extrémně vysokou pevností rovněž i excelentním vztahem „tuhost k hmotnosti“.

Velmi dobrá chemická odolnost, tak i neutrální chování při výkyvech teplot dělá balzové dřevo univerzálním jádrovým materiálem. Výhodou je jeho široké spektrum využití, především ve spojení s vláknovými kompozitními materiály v sendvičových konstrukcích v oblasti člunů, plachet a malých letadel, ale také pro jednotlivé typy rotorových lopatek u větrné energie. Balza se hodí pro laminování se všemi typy pryskyřic [23], [24].

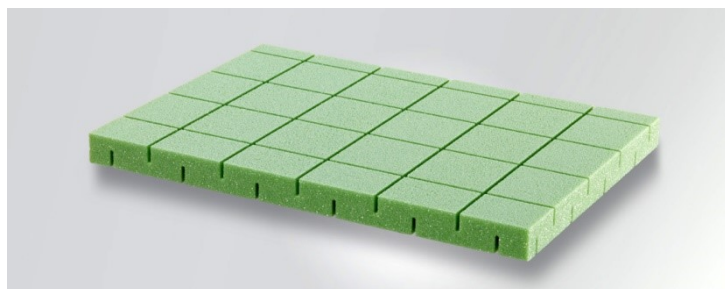


Obr. 1.19. Balzové dřevo je nejlehčí obchodní dřevo světa, váží méně než korek [25].

1.8.3 Tuhé pěny

Kromě voštin a balzy se dají využít jako jádrový materiál také tuhé pěny pro lehké a velmi pevné lamináty. Vysokopevnostní pěny s hustotou od 30 do 110 kg/m³ jsou používány především u malých letadel (větroně, sportovní letadla). Dále je najdeme v lodním, automobilovém a ve vlakovém průmyslu. Pěnové hmoty je možné přeformovat pod tlakem a teplotou.

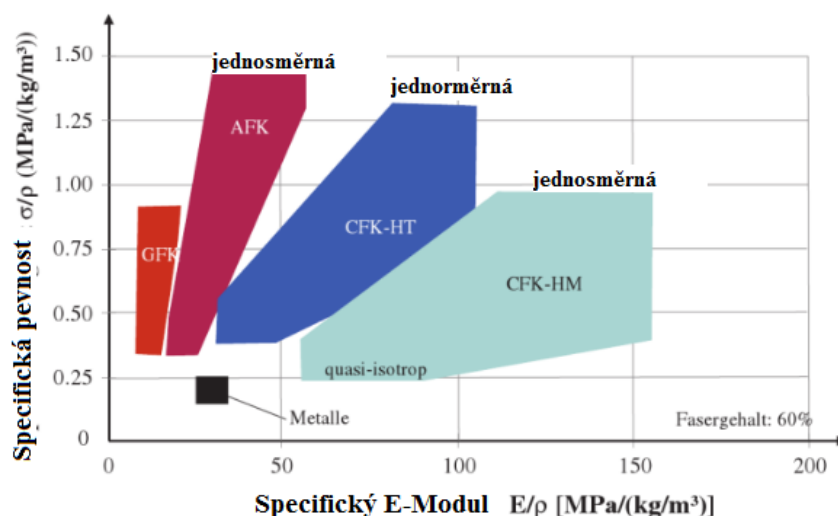
Univerzální strukturní pěnou je tzv. AIREX C70 (obr. 1.20). Jedná se polyvinylchloridovou pěnu (PVC) s uzavřenými póry. PVC pěny jsou odolné vůči absorpci vody. Rozsah jejich provozních teplot je velký a to od -240 °C do + 80 °C. Mimo to jsou odolné vůči chemickým látkám. Výhodou je také možnost aplikace polyesterové pryskyřice kvůli dobré odolnosti materiálu vůči styrenu [26], [11].



Obr. 1.20. Název produktu AIREX[®] se skládá ze slov „AIR“ pro vzduch a „EX“ pro expanzi [27].

1.9 KRYCÍ VRSTY SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ

Jako krycí materiál se používají velmi různé materiály (obr 1.21). Při výběru krycí vrstvy hrají důležitou roli kromě mechanických vlastností další požadavky jako tváření, korozní chování, tepelná rozpínavost, recyklovatelnost, výrobní náklady. V dnešní době se mezi krycí potahy řadí kovy, plasty, dále samozřejmě materiály jako dřevo nebo papír a široké spektrum využití se nachází taktéž u keramiky nebo kompozitních materiálů [28].



Obr. 1.21. Výpis specifických vlastností různě možných krycích materiálů. Kde jsou *Metalle* - kovy, *GFK* – plast vyztužený skleněnými vlákny, *CFK* – plast vyztužený uhlíkovými vlákny a *AFK* – plast vyztužený aramidovými vlákny [28].

Kovové vnější vrstvy:

Zejména je nacházíme u dopravní a lodní výroby. Jedná se o **duraly**, **oceli** a **slitiny**.

Nekovové vnější vrstvy:

Nekovové vnější vrstvy jsou nejčastěji z **plastu**, **kompozitu**, **papíru** nebo **dřeva**.

Kompozity:

Na vnější pláště se používají vláknové kompozity, kde hlavními složkami jsou vlákna a matrice. Jejich výhodou při aplikaci na vnější potah sendvičové konstrukce je především dobrá pevnost s nízkou hmotností s uplatněním v leteckém a kosmickém odvětví. Naopak nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady a těžké zpracování [4], [29].

1.10 SENDVIČOVÉ MATERIÁLY V PRŮMYSLU

Výhody kompozitních materiálů jsou stále více oceňovány v narůstajícím počtu průmyslového odvětví. Také stavební fasády, kabiny nákladních automobilů, potrubí, roboti se dnes skládají z kompozitních materiálů. Odvětví, ve kterých se tradičně používají ocelové nebo hliníkové konstrukce, objevují nyní kompozitní materiály, a vypracovávají se díky tomu do konkurenční výhody. Kompozitní materiály jsou využívány také pro automobilový průmysl, lodní dopravu, větrnou energii atd (obr. 1.22).

Kolejová doprava:

U moderních dopravních prostředků se požaduje rychlost, efektivnost, pohodlnost a bezpečnost. Rychlost, energetická účinnost, ale také komfort a bezpečnost cestujících je závislá silně na designovém návrhu, komponentech a použitých materiálech. Neboť čím lehčí jsou vagony vlaku, tím rychleji je vlak může zrychlit nebo zpomalit. Pevnější, odolnější, k čištění snadné materiály se projevují nízkými náklady na údržbu přes celou dobu životnosti vlaku. Tento lehký, odolný a kompaktní materiál je požadován pro přiměřené pohodlí cestujících. Pyšní se aspekty jako požární odolnost, ochranu proti hluku a tlakovým vlnám při vysoké rychlosti jízdy, dále přátelské a čisté životní prostředí. Všechny tyto aspekty jsou zajištěny použitím moderních kompozitních sendvičových materiálů.

Letecký průmysl:

Dlouhá životnost a nízká hmotnost materiálů jsou rozhodujícím kritériem v leteckém průmyslu. Vyspělé kompozitní materiály jsou z toho důvodu při volbě materiálu na předním místě. Náročný letecký průmysl byl prvním odvětvím, ve kterém byly vůbec kompozity využívány. Také dnes je ve vývoji a použití kompozitních materiálů nadále rozhodující [30].



Obr. 1.22. Využití kompozitního materiálu v různých odvětvích [30].

2 PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 CHARAKTERISTIKA DODANÝCH VZORKŮ

Vzorky sendvičů byly dodány Ing. Vladimírem Rusnákem z firmy Form s.r.o. a jejich složení je v (tab. 2.1).

Tab. 2.1. Složení sendvičových vzorků.

	Skladba
1	2x fenolický prepreg PH840-300-42 1x voština Cormaster C2-3,2-48 9 mm 1x fenolický prepreg PH840-300-42
2	2x fenolický prepreg PH840-300-42 1xAirex T90.100 9 mm 1x fenolický prepreg PH840-300-42
3	1x rohož 300 g/m2 1x Bidiagonálna tkanina Saertex 980g/m2 1xAirex T90.100 10 mm 1x Bidiagonálna tkanina Saertex 980g/m2 povrchová úprava gelcoat BUFA 250
4	2x fenolický prepreg PH840-300-42 1xCorecork NL 10 10 mm 1x fenolický prepreg PH840-300-42
5	1x rohož 300 g/m2 1x Bidiagonálna tkanina Saertex 980g/m2 1xCorecork NL 10 10 mm 1x Bidiagonálna tkanina Saertex 980g/m2 povrchová úprava gelcoat NGA Hx3 RAL 9010

2.2 MĚŘENÍ AKUSTICKÉ NEPRŮZVUČNOSTI

2.2.1 Rozdělení akustických vlastností

akustická pohltivost – schopnost povrchu konstrukce pohlcovat zvukovou energii a tím snížit hluk v jedné místnosti nebo ovlivnit kvalitu poslechu zvuku v dané místnosti,

vzduchová neprůzvučnost – schopnost dělicí konstrukce zabránit přenosu zvuku šířícího se vzduchem z jednoho prostoru do druhého,

kročejová neprůzvučnost – schopnost vodorovné konstrukce utlumit kročejový zvuk.

2.2.2 Stanovení laboratorní neprůzvučnosti R vzorku plošného materiálu dle ISO 10140

Cílem práce bylo měření a následné vyhodnocení vzduchové neprůzvučnosti R , dodaných vzorků plošného materiálu dle ISO 10140 a zejména pak vyhodnocení jednočíselné charakteristické neprůzvučnosti R_w , stanovené na základě směrné křivky dle ISO 717-1. V dalším textu bude postupně popsáno provedené měření a následně budou prezentovány získané výsledky. Rovněž není s ohledem na rozsah této práce možné uvést všechna naměřená data a dílčí výsledky. Bakalářská práce se omezuje na prezentaci základních a důležitých závěrů. S ohledem na charakter a uspořádání prováděné zkoušky lze předpokládat, že získané výsledky bude možné považovat za věrohodné. O této skutečnosti svědčí zejména následující předpoklady:

- vysílací místnost má dlouhou dobu dozvuku a je zde možné zajistit difuzní akustické pole (poměrně objemná místnost s holými stěnami, četnými výklenky a sloupy),
- místnost příjmu s velkou absorpční plochou a extrémně krátkou dobou dozvuku (polobezodrazová místnost),
- zdi, mimo zkoumaný stavební otvor, velmi tuhé, zdvojené s izolační vrstvou, uprostřed, minimalizují přenos bočními cestami. Vstup do polobezodrazové místnosti (obr. 2.1) je tvořen zakázkovými zdvojenými dvoukřídlými akustickými vraty o rozměrech $1,2m \times 2,2m$. Vstupní otvor je pro účely měření osazen redukčním přípravkem, který zajišťuje zvukotěsné zmenšení vstupního otvoru na formát měřeného

dílce. Měření hluku je hned z několika důvodů velmi vhodné provádět ve specializovaných místnostech s nízkou úrovní hluku pozadí při vypnutých zdrojích hluku, která byla využita jako přijímací místnost. Na následujících obrázcích jsou zachyceny prostory polobezodrazové místnosti VŠB - TU Ostrava v nichž je možno zkoušky tohoto typu provádět.

S ohledem na prováděná hluková měření je potřeba, aby prostor pro měření zajišťoval volné akustické pole v rozsahu nejméně 80Hz až 20000Hz a hladina hluku pozadí vážená váhovým filtrem a nepřesáhla na žádné ze sledovaných 1/3 oktávových složek hodnotu 12dB. V opačném případě by mohl hluk pozadí ovlivnit naměřená data. V průběhu měření byl provoz všech zařízení v okolí polobezodrazové místnosti omezen na minimum. Samotná polobezodrazová místnost byla v průběhu prováděného měření až na nezbytnou měřicí techniku prázdná, osazená redukčním přípravkem ve vstupním otvoru.



Obr. 2.1. *Vstup do polobezodrazové místnosti s akustickými vraty (vlevo) a polobezodrazová místnost (vpravo).*

Klimatické podmínky v průběhu závěrečného měření:

- teplota vzduchu: Zdr: 20,3°C Prj: 20,6°C,
- relativní vlhkost vzduchu Zdr: 54% Prj: 51%,
- hladina akustického tlaku (hluk pozadí) Zdr: 41,0dB(A) Prj: 14,6dB(A),
(20Hz - 20000Hz)
- atmosférický tlak 965hPa.

Použitá měřicí technika

Mikrofony

- B&K - Type 4189-A-021, přepolarizovaný mikrofon pro měření ve volném poli, rozměrová řada 1/2", jmenovitá citlivost 50 mV/Pa, S/N 2621983.
- B&K - Type 4189-A-021, přepolarizovaný mikrofon pro měření ve volném poli, rozměrová řada 1/2", jmenovitá citlivost 50 mV/Pa, S/N 2621984.

Zvukoměr

- B&K - Type 2232, S/N 1913942.

Zdroj hladiny akustického tlaku

- B&K - Type 4296, OmniPower, S/N 2071491.

Nízkofrekvenční výkonový zesilovač

- TIRA - Type BAA 60, Power Amplifier

Analyzátor

- B&K - Type 3560C, univerzální vysokorychlostní analyzátor, 4/2 kanálový modul
- B&K - Type 3109, modul síťového rozhraní: B&K - Type 7533, S/N 2348762

Kalibrátor

- B&K - Type 4231, hladina akustického tlaku (1000Hz) 94 dB + 20 dB S/N 1859532

Mikrofonní stojany

- Mannfrotto 307B, 4 kusy

Použitý hardware a software

- Notebook Fujitsu Siemens, procesor Intel centrino duo, 2048 MB RAM.
- B&K PULSE v.12.0.0, *Pulse LabShop*

K měření hladin akustického tlaku bylo využito dvoukanálové CPB analýzy a zdrojem budicího signálu byl generátor bílého šumu. Navíc byla pro každé měření ověřována stabilita budicího signálu pomocí jednoduchého precizního zvukoměru.

CPB analýza (analýza s konstantní šířkou pásma)

- Šířka pásma - 1/3 Oktávy
- Střední kmitočet dolního hraničního pásma - 100Hz
- Střední kmitočet horního hraničního pásma - 5000Hz
- Doba průměrování - 30 s
- Typ průměrování - lineární
- Váhový filtr - lineární

Generátor

- Generovaný signál - náhodný (bílý šum)
- Frekvencní rozsah - 0Hz až 6400Hz

Celý postup měření a vyhodnocení naměřených dat byl proveden dle popisu uvedeného v ISO 10140-2, ISO 10140-4 a ISO 10140-5. Pro vysvětlení, je však základní schéma a popis systému měření proveden v dalším textu.

Měření probíhalo takovým způsobem, že po zapnutí zdroje náhodného hluku, byly vždy pro jeden z namontovaných vzorků změřeny a vyhodnoceny hladiny

akustických tlaků ve vysílací a přijímací místnosti. Po montáži nového vzorku se celý postup opakoval dokud nebyly proměřeny všechny dodané vzorky.

Změřené hladiny akustických tlaků byly dále pro každou ze tří poloh zdroje hladiny akustického tlaku energeticky zprůměrnovány přes pomyslné měřicí plochy. Na základě takto získaných hodnot již bylo možné přistoupit k výpočtu vzduchové neprůzvučnosti pro jednotlivá třetino-oktávová pásma. Při vlastním zpracování byla provedena korekce měřených dat na hluk pozadí a bylo rovněž prověřeno splnění podmínek stability budicího signálu pro různé polohy zdroje v místnosti dle ISO 10140-2. Následně bylo provedeno zpracování získaných výsledků do podoby předepsané ve výše citované normě a byl sestaven formulář pro vyjádření výsledků zkoušky, který je přiložen na konci této technické zprávy. Základní výpočet neprůzvučnosti R pro jednotlivá 1/3-oktávová frekvenční pásma byl proveden následujícím způsobem:

$$R = L_{P1} - L_{P2} + 10 \log(S/A) \text{ [dB]},$$

kde L_{P1} je hladina akustického tlaku ve vysílací místnosti, L_{P2} je hladina akustického tlaku v místnosti příjmu a člen rovnice s logaritmem zohledňuje dozvukové vlastnosti polobezodrazové místnosti v poměru s plochou měřeného vzorku.

Druhým krokem výpočtu je stanovení jednočíselné veličiny neprůzvučnosti R_w vycházející z postupu popsání v ISO 717-1. Výpočet využívá metody nejmenších čtverců, pomocí které je vypočítaným 1/3-oktávovým spektrem vzduchových neprůzvučností proložená tzv. směrná křivka. Po proložení směrné křivky naměřenými daty s nejmenší možnou celočíselnou odchylkou je odečtena hodnota vzduchové neprůzvučnosti R_w , jako hodnota směrné křivky na kmitočtu 500Hz.

Proces vyhodnocení naměřených dat je zobrazen na obrázku 2.2.

V předchozím textu je proveden stručný popis měření vzduchové neprůzvučnosti vzorku plošného materiálu metodou, která vychází ze série norem ISO 10140. Naměřená data byla dále zpracována postupem navrženým v ISO 717-1.

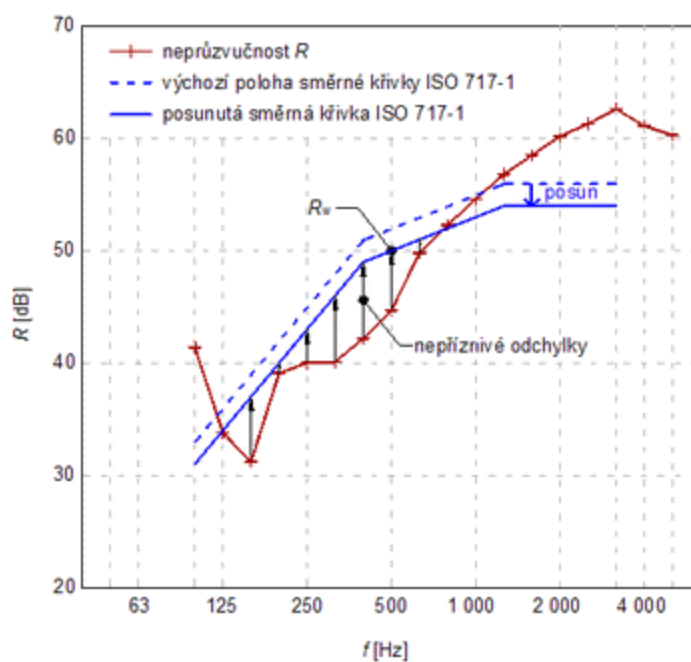
Vzor protokolu o měření je na obrázku 2.3. Výsledky měření neprůzvučnosti jsou uvedeny v tabulce 2.2.

Na základě prezentovaných výsledků a způsobu vyhodnocení naměřených dat můžeme konstatovat, že v první sérii vzorků 1-3 má největší zvuko útlumové schopnosti

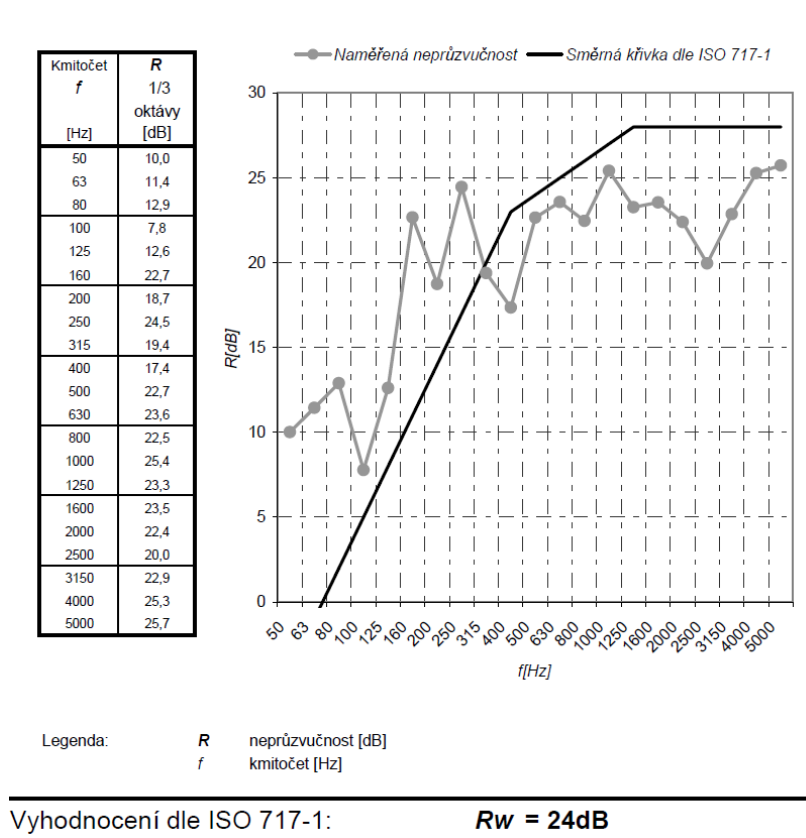
vzorek 3 s největší hodnotou $R_w=33\text{dB}$. Největší schopnost absorbovat zvuk má vzorka č. 5 a o něco nižší vzorka č. 4.

Tab. 2.2. Výsledky měření akustické neprůzvučnosti.

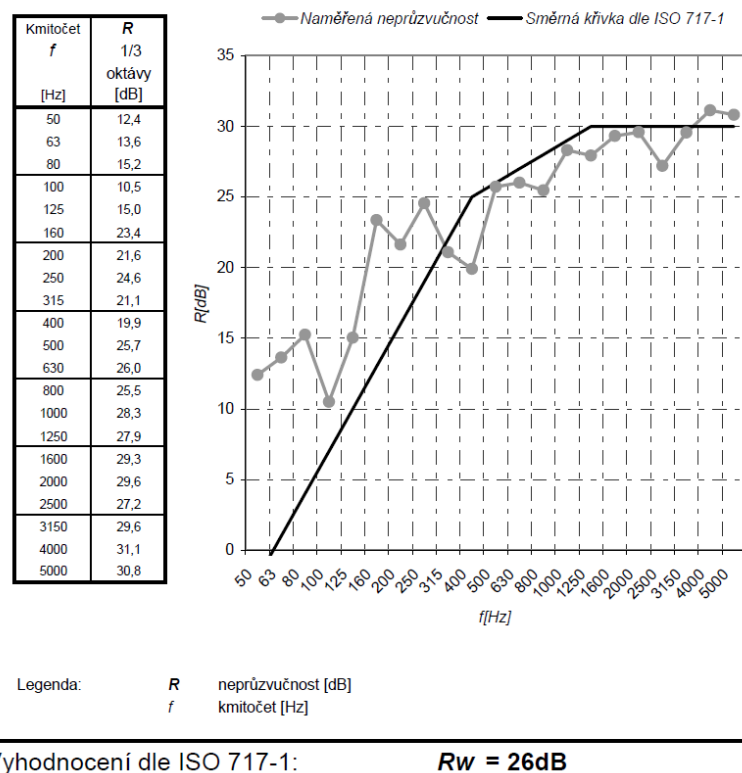
Physical value	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5
$R_w[\text{dB}]$	24	26	33	35	36



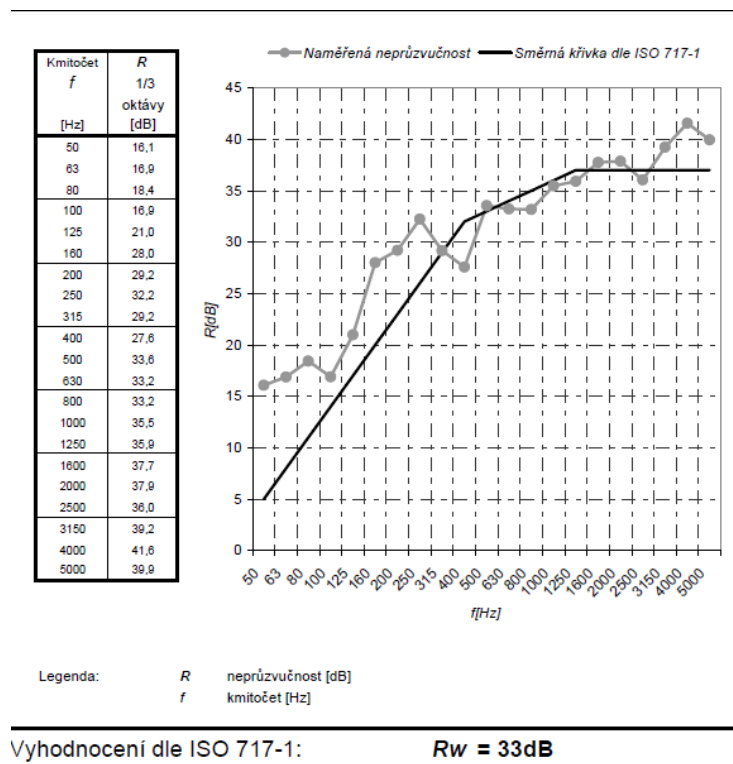
Obr. 2.2. Zpracování experimentálních dat.



Obr. 2.3. Vzor protokolu o měření, vzorek číslo 1.

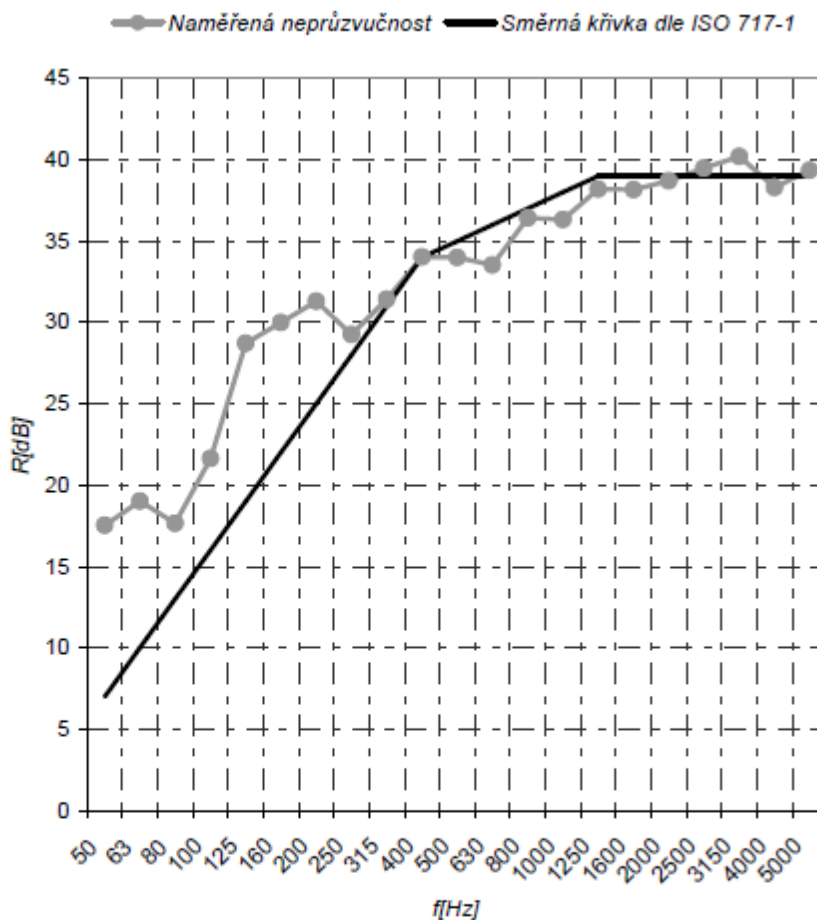


Obr. 2.4. Vzor protokolu o měření, vzorek číslo 2.



Obr. 2.5. Vzor protokolu o měření, vzorek číslo 3.

Kmitočet f [Hz]	R 1/3 oktávy [dB]
50	17,5
63	19,0
80	17,7
100	21,6
125	28,7
160	30,0
200	31,3
250	29,3
315	31,4
400	34,0
500	34,0
630	33,5
800	36,4
1000	36,3
1250	38,2
1600	38,2
2000	38,7
2500	39,5
3150	40,2
4000	38,3
5000	39,4



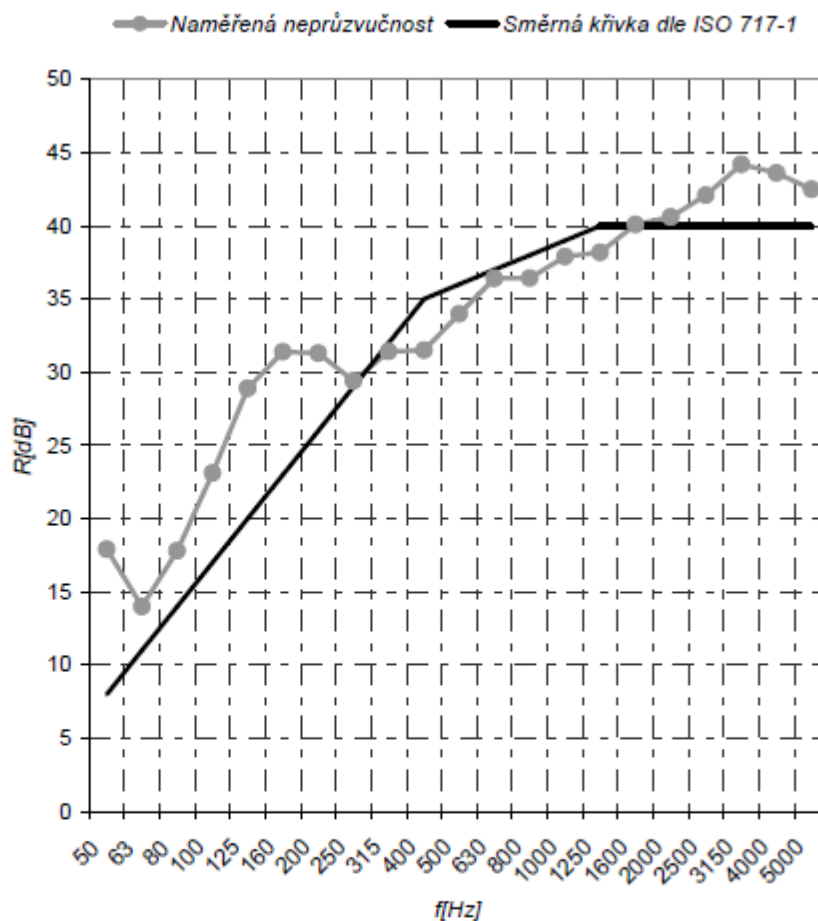
Legenda: R neprůzvučnost [dB]
 f kmitočet [Hz]

Vyhodnocení dle ISO 717-1:

$R_w = 35\text{dB}$

Obr. 2.6. Vzor protokolu o měření, vzorek číslo 4.

Kmitočet f [Hz]	R 1/3 oktávy [dB]
50	17,9
63	14,0
80	17,8
100	23,1
125	28,9
160	31,4
200	31,3
250	29,4
315	31,4
400	31,5
500	34,0
630	36,4
800	36,4
1000	37,9
1250	38,2
1600	40,1
2000	40,6
2500	42,1
3150	44,2
4000	43,6
5000	42,5



Legenda: R neprůzvučnost [dB]
 f kmitočet [Hz]

Vyhodnocení dle ISO 717-1:

$R_w = 36\text{dB}$

Obr. 2.7. Vzor protokolu o měření, vzorek číslo 5.

3 ZÁVĚR

Závěrem můžeme zkonstatovat následující: V rámci bakalářské práce bylo připraveno pět vzorků sendvičových struktur, tak jak byly popsány výše. Vzorky byly měřeny na akustickou neprůzvučnost. Ukazuje se, že nejlepší hodnoty akustické neprůzvučnosti z první série vzorků 1-3 má největší zvuko útlumové vlastnosti vzorek 3. Vzorek č. 5 má největší schopnost absorbovat zvuk o něco nižší schopnost absorbovat zvuk má vzorek č. 4.

Byla zkoumána také tepelná vodivost uvedených vzorků, která však není součástí této práce, šlo tedy o komplexní pohled na tepelné a akustické izolační vlastnosti uvedených materiálů.

Ukazuje se, že uvedené materiály podle získaných výsledků mohou být úspěšně využity v dopravním průmyslu (tramvaje, autobusy atd.) jako tepelně i akusticky izolační materiály. Moderní technologie sendvičových struktur s použitím inovativní kombinace materiálů je tedy velkým přínosem pro současný průmysl i pro budoucí využití různých technologických systémů.

3.1 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Bareš, Richard a Bareš, Richard A. *Kompozitní materiály*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury n.p., 1988. ISBN 1-230286-3258/89.
- [2] Agarwal, Bhagman D. a Broutman, Lawrence J. *Vláknové kompozity*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury n.p., 1987.
- [3] Daďourek, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2007. str. 113. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [4] Kořínek, Zdeněk. Kompozity. [Online] [Citace: 18. listopad 2015.] <http://mujweb.cz/zkorinek/>.
- [5] Janovec, Jiří, Cejp, Jiří a Steidl, Josef. *Pespektivní materiály*. Praha : České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [6] Polymer Engineering Bayreuth - Prof. Dr.-Ing. Volker Altstädt. [Online] [Citace: 5. březen 2016.] <http://polymer-engineering.de/forschung/gebiete/leichtbauwerkstoffe/prepreg-technologie.html>.
- [7] Form. [Online] [Citace: 5. březen 2016.] <http://www.form-composite.com/prepreg>.
- [8] Lengsfeld, Hauke, a další, a další. *Faserverbundwerkstoffe*. Bayreuth : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014. str. 223. ISBN: 978-3-446-43300-7.
- [9] Fraunhofer. [Online] [Citace: 5. březen 2016.] http://www.pyco.fraunhofer.de/de/F_und_E/Materialien_und_Technologien/halbzeuge_materialienfvk/Prepregtechnologie.html.
- [10] Košťál, Pavol. Přednáška. *Polymerné kompozitné materiály*. Ostrava : autor neznámý.
- [11] Milwich, Markus. *Faserverbundwerkstoffe Handbuch. suter-kunststoffe*. [Online] 2009. [Citace: 6. březen 2016.] <http://www.swiss-composite.ch/>.
- [12] Ubc. [Online] [Citace: 11. březen 2016.] <http://www.ubc-gmbh.com/de/>.
- [13] Callister, William D. *Materials Science and Engineering An introduction*. Utah : John Wiley & Sons, Inc., 2007. ISBN-13:978-0-471-73696-7.

- [14] Lange+ Ritter. [Online] [Citace: 12. Březen 2016.] <http://www.lange-ritter.de/>.
- [15] Höhn, Bernard Robert, Winter, Hans a Niemann, Gustav. *Maschinenelemente: Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen*. Berlin; Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001. ISBN 978-3-662-08521-9.
- [16] Institut für Flugzeugbau. [Online] [Citace: 12. března 2016.] <http://www.ifb.uni-stuttgart.de/fertigungstechnologie/sandwichstrukturen.html>.
- [17] CelComponents. [Online] [Citace: 12. března 2016.] <http://www.cel.eu/>.
- [18] Foldcore. [Online] [Citace: 12. března 2016.] http://www.foldcore.eu/index.php?option=com_content&view=section&layout=blog&id=8&Itemid=69.
- [19] MM Průmysloví spektrum. [Online] [Citace: 13. března 2016.] <http://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce.html>.
- [20] Leichtbau. [Online] [Citace: 12. března 2016.] <http://www.leichtbau-netz.de/kernwerkstoffe/index.php>.
- [21] Hexcel. [Online] [Citace: 12. března 2016.] <http://www.hexcel.com/de/ahoneycombs>.
- [22] Plzeňské tramvaje. [Online] [Citace: 13. března 2016.] <http://www.plzensketramvaje.cz/?page=astra.htm>.
- [23] Gaugler & Lutz oHG. [Online] [Citace: 18. března 2016.] <http://www.gaugler-lutz.de/leicht-sandwichbau/baltek.html>.
- [24] boesner. [Online] [Citace: 18. března 2016.] <http://www.boesner.com/plastisches-gestalten/modellbau/modellbauprodukte/balsaholz>.
- [25] L. Stelling GmbH. [Online] [Citace: 18. března 2016.] <http://www.ls-holz.de/balsaholz.html>.
- [26] Havel Composites CZ s.r.o. [Online] [Citace: 18. března 2016.] http://www.havel-composites.com/ktlgfiles/cz_katalog.pdf.

[27] Airex AG Industrie Nord 26. [Online] [Citace: 18. březen 2016.]

<http://www.airexbaltekbanova.com/de/airex-schaumstoff.html>.

[28] Friedrich, Horst E. *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. Stuttgart : Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, 2013. ISBN 978-3-8348-1467-8.

[29] Yung Niu , Michael Chun. *Composite airframe structures : practical design information and data*. Hong Kong : 1st ed. , 1992. str. 664. ISBN-10: 9627128066.

[30] Gurit. [Online] [Citace: 25. listopad 2015.] <http://www.gurit.de/>.